



УДК 62-83:621.313.33

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СЛУЧАЙНОГО НАГРУЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

FEATURES OF RANDOM LOADING PROCESSES MODELING

Борноволоков Андрей Юрьевич, магистрант каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: bornovolokovandrey@yandex.ru. Тел.: +7 (343) 375-46-46.

Метельков Владимир Павлович, канд. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru. Тел.: +7 (343) 375-46-46.

Andrey Y. Bornovolokov, Master student, «Electrical Drive Department», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: bornovolokovandrey@yandex.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46.

Vladimir P. Metelkov, Cand. Sc., Associate Prof., «Electrical Drive Department», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

Аннотация: В статье рассматриваются особенности моделирования случайных процессов в электроприводе. Исследуется влияние вариабельности длительности цикла при работе асинхронного двигателя в повторно-кратковременном режиме на скорость термического износа изоляции. В ходе исследования проведено моделирование режима случайного нагружения электропривода в приложении Simulink пакета Matlab с использованием разработанного блока задания момента двигателя, который был разработан для данного исследования. Приведены результаты моделирования и описание работы разработанного блока формирования случайной нагрузки.

Abstract: The article deals with peculiarities in modeling of stochastic loading process in electrical drive. The influence of variability of the cycle duration during the operation of an asynchronous motor in the recursive short-term mode on the rate of insulation thermal aging is investigated. In the course of the study, simulation of the random load mode of the electric drive in the Simulink application of the Matlab package was performed using the developed motor torque setting unit. Examples of simulation results and description of new block are shown.

Ключевые слова: асинхронный двигатель; повторно-кратковременный режим; термическое старение изоляции; моделирование; случайная нагрузка.

Key words: induction motor; intermittent mode; thermal aging of insulation; simulation; random loading.

ВВЕДЕНИЕ

В промышленности существует большое количество электроприводов, работающих в повторно-кратковременном режиме, величина нагрузки которых изменяется случайным образом. Это относится, в первую очередь, к транспортным механизмам и экскаваторам. Величина потерь в двигателе в течение рабочего цикла изменяется, соответственно изменяется и температура нагрева обмоток [1, 2]. Случайный характер изменения этой температуры влияет на скорость термического старения изоляции по сравнению с работой двигателя при постоянной температуре его обмоток. Выбор двигателя по мощности с

учетом этого влияния является достаточно трудоемкой задачей [1].

Как следует из центральной предельной теоремы теории вероятностей [3], при увеличении количества случайных факторов, определяющих некоторую величину, характеризующую состояние технического объекта, закон распределения плотности вероятности этих значений стремится к нормальному. Случайному закону распределения может подчиняться также изменяющаяся величина нагрузки двигателя, в качестве которой будем принимать момент двигателя. Однако реальные величины в технике всегда имеют разного рода ограничения, которые влияют на функцию плотности распределения

вероятности. Например, длительность цикла не может быть отрицательной величиной, а момент двигателя ограничен перегрузочной способностью двигателя. Поэтому законы распределения величины нагрузки и времени ее действия могут подчиняться и другим законам распределения.

В этой работе задачей исследования является определение влияния вариабельности длительности цикла в повторно-кратковременном режиме на скорость термического старения изоляции обмоток асинхронного двигателя.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В исследовании использовалась модель асинхронного двигателя в относительных единицах, включающая термодинамическую и энергетическую части. Термодинамическая часть построена на основе 5-массовой тепловой схемы асинхронного двигателя закрытого исполнения (рис. 1). На рис. 1 обозначено: 1 и 2 – лобовые и пазовые части обмотки статора; 3 – сталь статора; 5 – ротор; 6 – станина; λ_{ij} – тепловые проводимости между узлами тепловой схемы; λ_{60} – тепловая проводимость от станины к окружающему воздуху. Узел 4, соответствующий внутреннему воздуху на схеме не показан, так как он исключен путем структурных преобразований этой схемы.

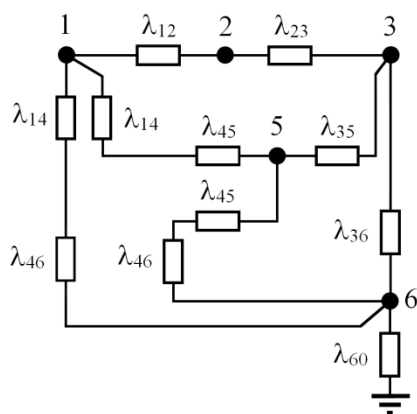


Рис. 1. Пятимассовая тепловая схема закрытого асинхронного двигателя

Моделирование случайной нагрузки двигателя производилось с помощью разработанного для данного исследования блока задания момента. Он формирует сигнал, у которого амплитуда и длительность распределяются по одному из законов: нормальному, равномерному или Пуассона. Для равномерного закона распределения можно выбрать границы интервала распределения. Для нормального закона распределения – математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение (СКО). Для распределения Пуассона – математическое ожидание. Закон распределения для интервала и

амплитуды выбирается с помощью выпадающего списка. На рис. 2 приведена маска параметров блока задания момента. Момент задается в относительных единицах (о.е.), где в качестве базисной величины принят номинальный момент (M_N). Также в данном блоке можно выбрать режим работы электропривода: повторно-кратковременный (S3) или перемежающийся (S6). Для повторно-кратковременного следует выбрать продолжительность включения (ПВ). Эти параметры являются входами s-функции, написанной на языке Matlab, в которой и формируется выходной сигнал.

Задатчик амплитуды (mask)

Блок осуществляет задание амплитуды и длительности импульса по выбранному закону распределения.

Parameters

Закон распределения амплитуды: Равномерное

Закон распределения для периода: Нормальное

Мин. амплитуда для РЗР (о.е.)

0

Макс. амплитуда для РЗР (о.е.)

0

Мин. период для РЗР (о.е.)

0

Макс. период для РЗР (о.е.)

0

Мат. ожидание амплитуды для НЗР (о.е.)

0

СКО амплитуды для НЗР (о.е.)

0

Мат. ожидание периода для НЗР (о.е.)

0

СКО периода для НЗР (о.е.)

0

Мат. ожидание амплитуды для РП (о.е.)

0

Мат. ожидание периода для РП (о.е.)

0

Режим работы S1

ПВ

0

Постоянный период (о.е.)

0

OK Cancel Help Apply

Рис. 2 Параметры блока задания момента

На рис. 3 приведены зависимости от времени момента двигателя при постоянной длительности цикла (a) и случайной при ее СКО 0,005 в о.е. (b). В качестве базисного времени (t_0) принято отношение суммарной теплоемкости двигателя к тепловой проводимости в окружающую среду.

ВЛИЯНИЕ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЦИКЛА НА СКОРОСТЬ РАСХОДА ИЗОЛЯЦИИ

Было проведено параллельное моделирование двух режимов работы электропривода – с постоянной длительностью цикла и случайной.

В режиме 1 двигатель работал в повторно-кратковременном режиме (S3) со следующими параметрами:

$$ПВ=50\%; \Delta p_{\Sigma cp} = \Delta p_{\Sigma N}; t_u/t_6=0,01; m=1,58,$$

где $\Delta p_{\Sigma cp}$ – средняя за цикл суммарная мощность потерь; $\Delta p_{\Sigma N}$ – номинальная суммарная мощность потерь; t_u/t_6 – относительная длительность цикла; $m=M/M_N$ – относительная величина момента двигателя.

В режиме 2 двигатель работал в повторно-кратковременном режиме со следующими параметрами:

$$ПВ=50\%; \Delta p_{\Sigma cp} = \Delta p_{\Sigma N}; M[t_u/t_6]=0,01;$$

$$\sigma_t[t_u/t_6]=[0; 0,001; \dots; 0,006]; m=1,53,$$

где $M[t_u/t_6]$ – математическое ожидание продолжительности цикла работы, $\sigma_t[t_u/t_6]$ – СКО этой величины.

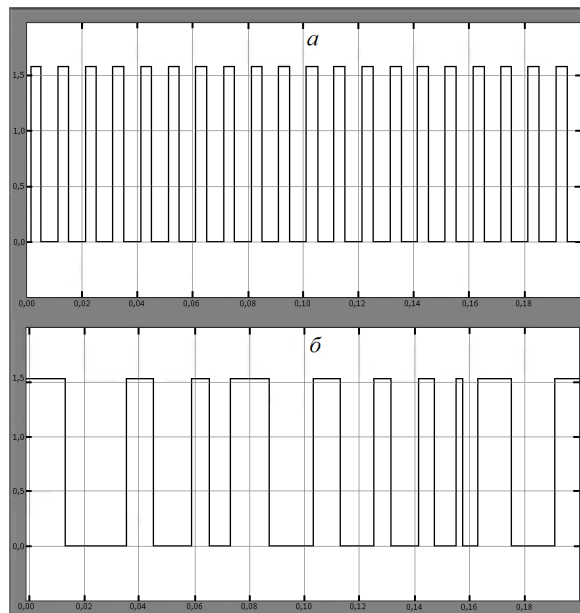


Рис. 3. Момент двигателя при постоянной длительности цикла (а) и случайной длительности цикла при СКО 0,005 (б).

При нелинейной зависимости, связывающей скорость термического старения изоляции с температурой, в случае колебаний температуры обмотки средняя скорость старения изоляции (v_{cp})

всегда оказывается больше той, которая была бы при неизменной температуре, равной средней (θ_{1cp}) [4], причем, с увеличением амплитуды колебаний эта разница увеличивается (см. рис. 4).

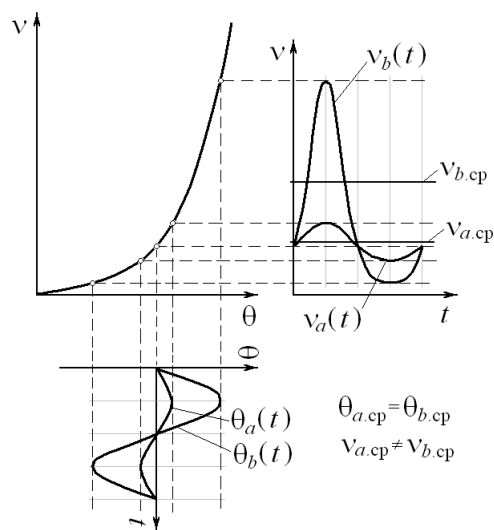


Рис. 4. Соотношение между средней температурой и средней за цикл скоростью старения изоляции

Для оценки скорости старения изоляции (v) будем пользоваться формулой Буссинга, полученной исходя из законов кинетики химических реакций [5, 6]:

$$v = k^{-1} e^{-\frac{B}{\theta_1 + \theta_A} + G}, \quad (1)$$

где θ_1 – температура обмотки; $\theta_A=273^\circ\text{C}$; B и G – постоянные коэффициенты, величина которых зависит от класса нагревостойкости изоляции; $k=1$, если срок службы изоляции измеряется в часах.

Ускорение расхода термического ресурса изоляции будем характеризовать коэффициентом

$$k_R = v_{cp} / v(\theta_{1cp}), \quad (2)$$

где v_{cp} и θ_{1cp} вычислены за время моделирования t_m как

$$v_{cp} = \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} v(t) dt, \quad \theta_{1cp} = \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} \theta_1(t) dt. \quad (3)$$

Для придания общности результатам исследования, использовались такие значения параметров модели, которые являются усредненными (в относительных единицах) для группы асинхронных двигателей средней мощности закрытого исполнения с изоляцией класса F.

В ходе моделирования получена зависимость между коэффициентом ускорения расхода термического ресурса изоляции обмотки статора k_R и СКО продолжительности действия нагрузки (см. рис. 5). Кривая 1 на рис. 5 показывает зависимость относительной скорости расхода изоляции от СКО длительности цикла для лобовой части обмотки, а кривая 2 – для пазовой. Здесь использовался нормальный закон распределения времени цикла при ПВ=50%.

Возрастающая зависимость k_R объясняется тем, что, при работе в режиме со случайной продолжительностью интервалов, увеличивается длительность рабочего участка в некоторых циклах за счет увеличения отклонения от средней величины [7, 8]. При этом температура обмоток на более длительных интервалах успевает возрасти сильнее, чем при длительности цикла, равной средней величине. Это приводит к увеличению амплитуды колебаний температуры.

Из выражения (1) очевидно, что при этом происходит увеличение скорости старения изоляции. Причем, из-за нелинейности кривой (1), это увеличение на более длительных интервалах не компенсируется за счет более коротких интервалов. Таким образом, подтверждается тот факт, что при одинаковой средней мощности потерь, увеличение колебаний длительности цикла (или периода действия нагрузки) относительно среднего значения ведет к увеличению скорости расхода изоляции в двигателе.

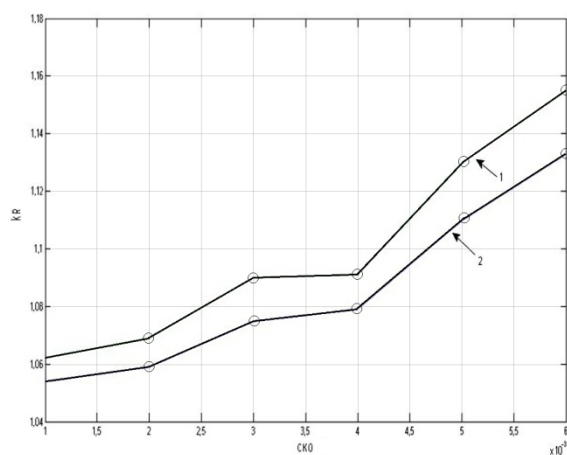


Рис. 5. Зависимость скорости расхода термического ресурса изоляции от СКО длительности цикла: 1 – для лобовой части обмотки, 2 – для пазовой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования вариабельности длительности цикла подтверждается тот факт, что при одинаковой средней мощности потерь, увеличение колебаний длительности цикла (или периода действия нагрузки) относительно среднего значения ведет к увеличению скорости расхода термического ресурса изоляции обмотки двигателя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние колебаний температуры на долговечность изоляции обмотки статора асинхронных двигателей в случайных режимах нагружения / Браславский И.Я., Метельков В.П., Есаулкова Д.В., Костылев А.В. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 2 (544). С. 18–23.
2. Зюзев А.М., Метельков В.П. Учет влияния колебаний температуры обмотки статора на термический ресурс асинхронного двигателя // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Том 2. №1. С. 62–71.
3. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Корн Г., Корн Т. М.: Наука, 1984. 832 с.
4. Зюзев А.М., Метельков В.П. Термодинамические модели для проверки асинхронного двигателя по нагреванию // Электротехника. 2012. №9, С. 48–52.
5. Кузнецов Н. Л. Надежность электрических машин. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 432 с.
6. Brancato E. L. Estimation of lifetime expectancies of motors. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 8, No. 3, May/Jun. 1992, pp. 5–13.
7. I. Ya. Braslavsky, V. P. Metelkov, D. V. Esaulkova, A. V. Kostylev, K. A. Kondakov. Toward the evaluation of the influence of temperature fluctuations on the durability of the stator winding insulation of asynchronous motors in random mode loading. 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). 2016, pp. 447–451.
8. К оценке влияния колебаний температуры на долговечность изоляции обмотки статора асинхронных двигателей в случайных режимах нагружения / Браславский И.Я., Метельков В.П., Есаулкова Д.В., Костылев А.В. // Труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока", г. Екатеринбург, 05-09 октября 2015 г. Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 67–70.